

УДК 622.831

А.А. Козырев, И.Э. Семенова, А.В. Земцовский

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОГО ЦЕЛИКА
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫЕМКЕ ЗАПАСОВ
ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРТОМЧОРР
В ХИБИНСКОМ МАССИВЕ**

Перспективное месторождение Партомчорр располагается вблизи Симбозерского заповедника, в связи с чем возникает необходимость минимизации влияния отработки подземных запасов апатит-нефелиновых руд на окружающую среду и сохранения дневной поверхности в первоначальном нетронутом состоянии. С целью выбора системы разработки, удовлетворяющей данным условиям, проведен многовариантный прогноз изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород Партомчоррского месторождения по мере выемки полезного ископаемого. Расчеты выполнены методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса Sigma3D, разработанного в Горном институте КНЦ РАН. Приведены результаты моделирования НДС массива горных пород в окрестности месторождения Партомчорр при применении различных систем разработки, а также анализ распределения растягивающих деформаций в подработанной толще пород. Обоснованы безопасные параметры приповерхностного целика и предлагаемой для применения камерно-целиковой системы с открытым очистным пространством.

Ключевые слова: геомеханика, численное моделирование НДС, устойчивость целиков, предел прочности пород, обоснование параметров системы разработки.

Партомчоррское месторождение расположено на территории Кировского района, в пределах Хибинского щелочного массива, в 30 км севернее г. Кировска. Месторождение пространственно связано с породами комплекса ийолит-уртитов. Рудная зона мощностью до 185 м, представленная переслаиванием апатит-нефелиновых руд с урритами и йолитами, прослежена по простиранию на расстоянии до 6,0 км и по падению на 1,2 км до отметки — 600 м. Падение рудной зоны пологое, 30—35° ЮВ. По составу и пространственному положению в рудной

зоне выделяются три рудных тела, разделенные на отдельных участках безрудными прослоями. Форма рудных тел пластообразная, линзовидная.

Особенности геомеханического состояния месторождения «Партомчорр» обусловлены несколькими факторами: действием в массиве тектонических сил; гористым рельефом поверхности; значительной обводненностью пород. Указанные факторы, а также необходимость сохранения нетронутой дневной поверхности должны учитываться при выборе технологических систем разработки и их параметров. Для решения данной зада-

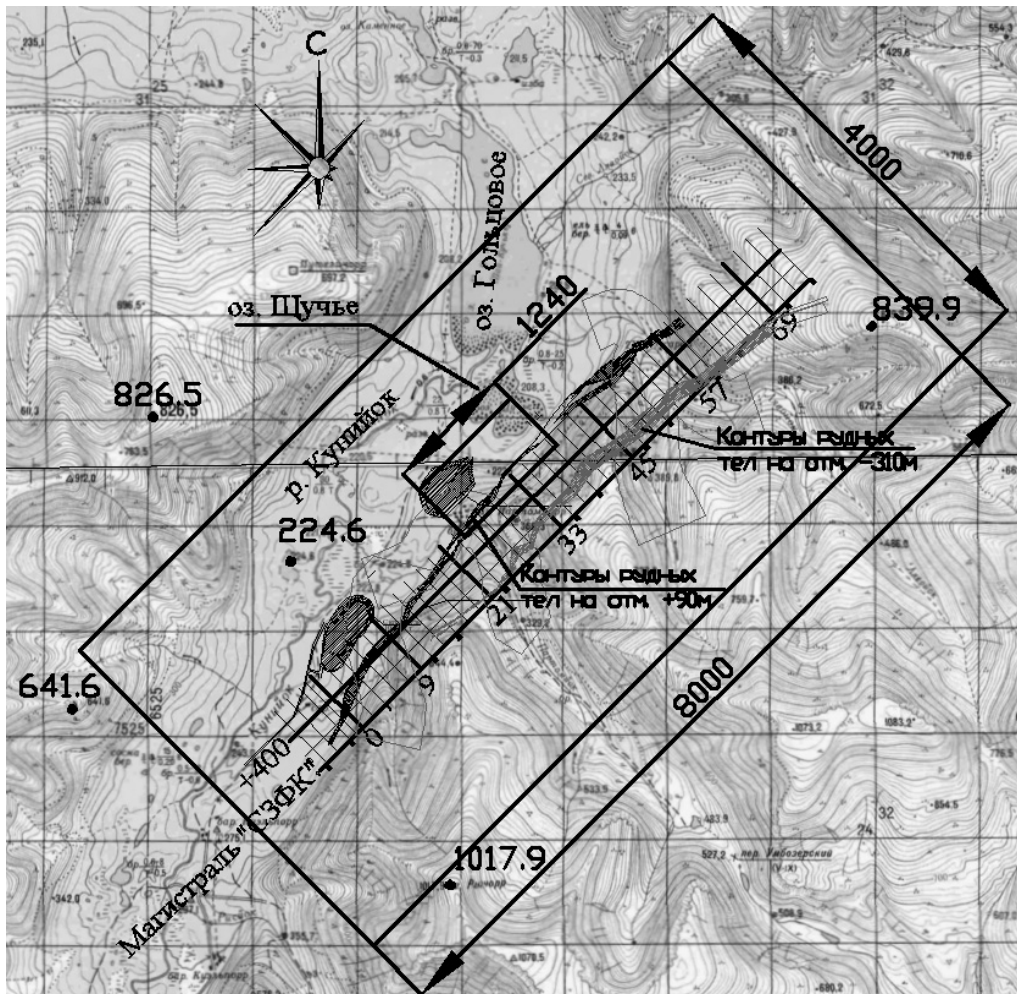


Рис. 1. Карта района месторождения с границами моделей

чи выполнена многовариантная прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород Партомчоррского месторождения по мере выемки запасов полезного ископаемого. Карта района месторождения с проекциями рудных тел и границами расчетных областей приведена на рис. 1.

На основе анализа горно-геологической, геомеханической и технологической информации разработаны численные модели для расчета НДС

исследуемого массива на нескольких масштабных уровнях. Расчеты выполнялись методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса Sigma3D, разработанного в Горном институте КНЦ РАН [1].

Для получения достоверных результатов расчетного поля напряжений применена методика последовательных приближений, в соответствии с которой моделирование выполнялось в несколько этапов.

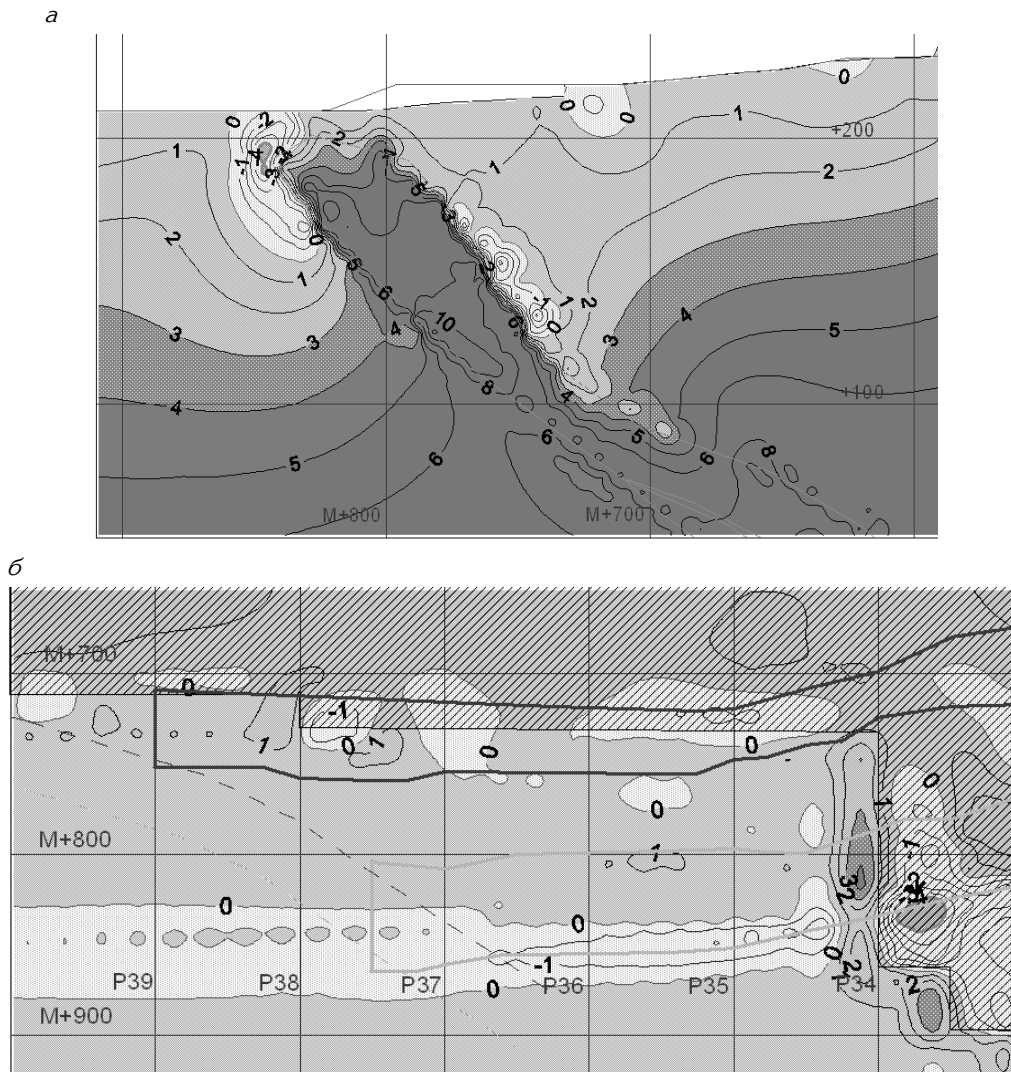


Рис. 2. Распределение σ_{\min} в массиве пород до начала отработки запасов а) по разрезу 34+40м, б) в слое элементов под поверхностью

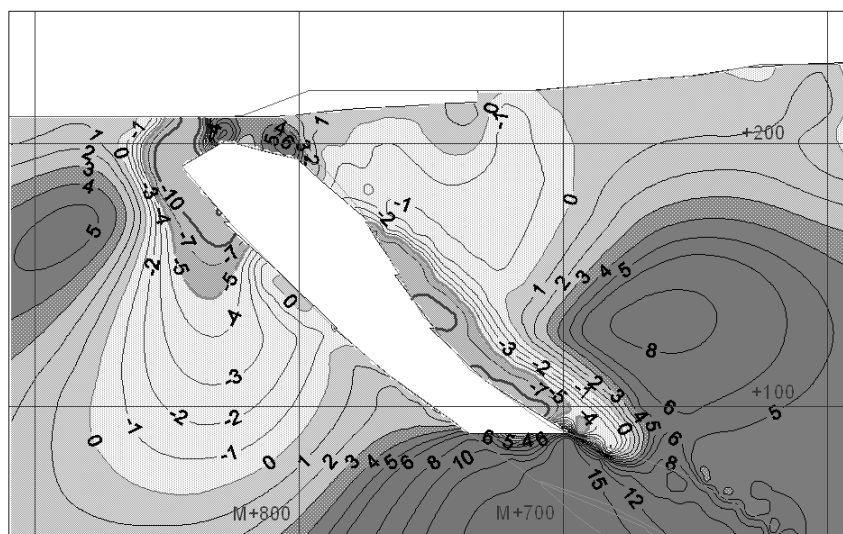
Граничные условия для мелко-масштабной модели задавались на основе сформировавшихся на сегодняшний день представлений о напряженном состоянии пород в Хибинском массиве. Самым существенным с точки зрения формирования полей напряжений фактором для данного массива пород является действие в нем тектонических напряже-

ний. Максимальная компонента напряжений ориентирована параллельно или субпараллельно простиранию рудной залежи, абсолютные величины напряжений и их изменение с глубиной предполагались аналогичными напряжениям на других месторождениях Хибин, для которых собрана достаточная база натуральных измерений напряжений.

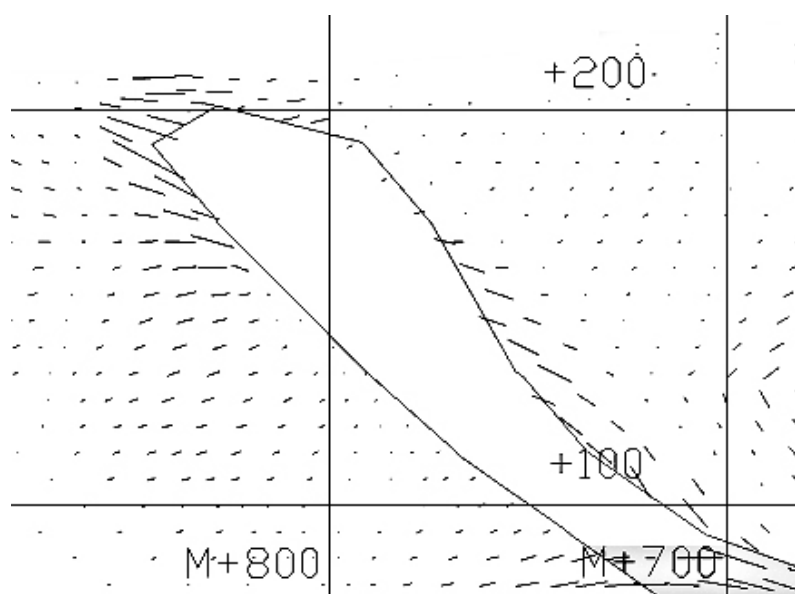
В результате получено исходное поле напряжений массива пород, включающего месторождение Партомчорр, которое характеризуется как высоконапряженное (значения максимальной компоненты сжимающих напряжений от 40 до 55 МПа) с ориентацией σ_{max} по простиранию

рудных тел в высотных отметках будущих подземных горных работ. Концентрация σ_{max} приурочена к долине, под которой и будет начата отработка запасов. В самом рудном теле уровень напряжений несколько ниже и варьируется в пределах 40—45 МПа.

а



б



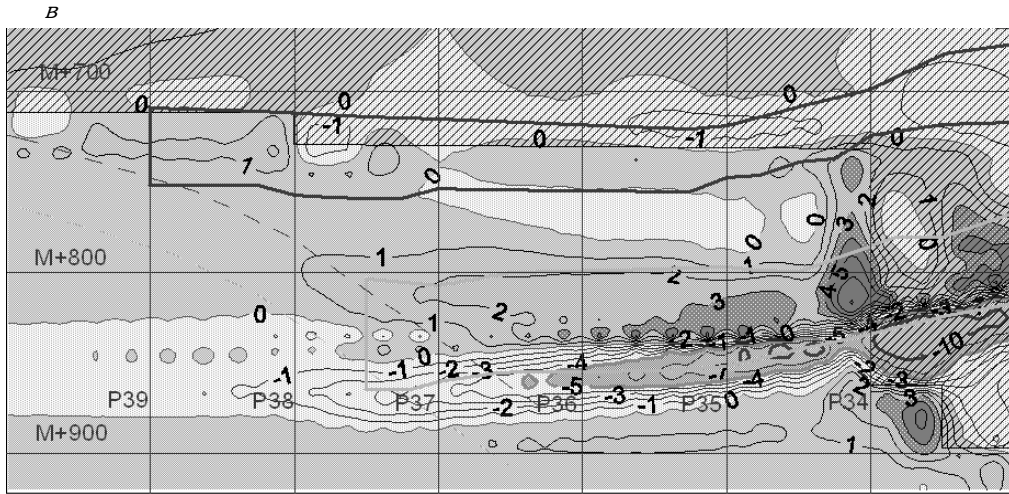


Рис. 3. Распределение σ_{\min} после отработки запасов выше отметки +90м в пределах разрезов 30—39: а — по разрезу 34+40 м, б — площадки по разрезу 34+40 м в — в слое элементов под поверхностью

Модель второго этапа (крупномасштабная) включает участок месторождения Партомчорр протяженностью 1240 м (от разреза 26 до разреза 41+40); ее размер вкрест простирается — 560 м; нижняя граница модели расположена на отметке +10 м. В качестве граничных условий были заданы узловые перемещения, полученные на первом этапе моделирования.

Для данной модели рассчитана серия вариантов со сплошной выемкой рудного тела выше отметки +90 м в пределах разрезов 30÷39 между охранными целиками. Минимальные размеры приповерхностного целика в вариантах меняли от 20 до 50 метров.

Анализ НДС выполнен для максимальной и минимальной компонент главных напряжений (σ_{\max} , σ_{\min}). Для выявления зон возможного разрушения массива было важно выявление областей растяжения, так как вмещающие породы и рудное тело имеют значительно более низкий предел прочности на растяжение, чем на

сжатие. Направление прорастания потенциальных трещин отрыва определяли по ориентировке площадок, на которые действуют напряжения растяжения с абсолютной величиной выше предельной.

Приведем сначала результаты расчетов для исходного состояния массива по разрезу 34+40 м, где отмечаются более высокие напряжения сжатия (рис. 2, а); а также в слое элементов непосредственно под дневной поверхностью (рис. 2, б). Штриховкой показана зона, где данный слой элементов уходит под гористый рельеф, сплошными линиями — границы проектной очистной выемки, пунктирными — границы охранного целика 4 (светлый тон — горизонт +170 м, темный тон — горизонт +90 м).

Как видно наибольший уровень растягивающих величин σ_{\min} (около 4 МПа) наблюдается у верхней угловой зоны рудного тела в лежачем боку рудной залежи. Подобное распределение σ_{\min} характерно и для

других разрезов. Под дневной поверхностью долины также прослеживается область растягивающих напряжений, но значения σ_{\min} в ней не превышают 2 МПа. Предел прочности вмещающих пород на растяжение ≈ 10 МПа, однако при развитой естественной трещиноватости это значение снижается.

Ситуация в приповерхностной зоне при сплошной выемке запасов рудного тела выше отметки +90 м в пределах разрезов 30÷39 между охранными целиками 2 и 4 (рис. 3) заметно ухудшается. Так, значения растягивающих напряжений над очистным пространством в лежащем боку рудного тела достигают 10 МПа, и зона критических по абсолютным величинам растяжений выходит на дневную поверхность. Кроме того, направление вероятных трещин отрыва (рис. 3, б), под углами 60—80° будет способствовать разрушению потолочины созданного обнажения и сокращению приповерхностного целика, что в свою очередь с большой долей вероятности приведет к обрушению вмещающих пород до дневной поверхности.

Было рассмотрено еще несколько вариантов с увеличенной потолочиной. Имитировали выемку запасов в тех же разрезах, но без отработки верхней части рудного тела. Это, безусловно, снижает уровень опасных растягивающих напряжений, однако в недостаточной мере.

На дневной поверхности наблюдается протяженная зона растягивающих напряжений σ_{\min} , абсолютная величина которых более 3 МПа. Как отмечено в [3], до отметки +130 м выделяются зоны повышенной трещиноватости, кроме того в долине реки

Кунийок и у озера Щучье находится слой рыхлых четвертичных отложений, мощность которого колеблется в пределах 40—50 м в осевой части долины, а на выходе рудной залежи составляет от 10 до 26 м.

Таким образом, сплошная выемка запасов, например, при применении системы разработки с подэтажным обрушением, приведет к обрушению подработанной толщи до дневной поверхности. Альтернативным вариантом системы разработки является камерно-целиковая система с открытым очистным пространством.

Для геомеханического обоснования брали предложенное соотношение размеров камер и целиков 60 м и 20 м соответственно. В сетку конечных элементов крупномасштабной модели были добавлены сечения вкрест простирания рудной залежи таким образом, чтобы шаг между сечениями составлял 5 м, и возможно было варьирование размеров целиков.

Оценивали изменение напряженно-деформированного состояния по мере развития работ, как в окрестностях камер, так и непосредственно в междукамерных и междуэтажных целиках. На рис. 4 представлены изолинии максимальной компоненты напряжений σ_{\max} по центру камер (наклонный разрез по простиранию рудной залежи) для варианта с тремя камерами по 60 м и целиками 20 м. Исходные значения σ_{\max} для исследуемого участка массива составляют около 40 МПа в руде, около 45 МПа во вмещающих породах. С образованием камер появляются зоны концентраций напряжений в потолочине камер — с величинами до 70 МПа, в междукамерных целиках — с величинами до 65 МПа, а также у днища камер — до 60 МПа.

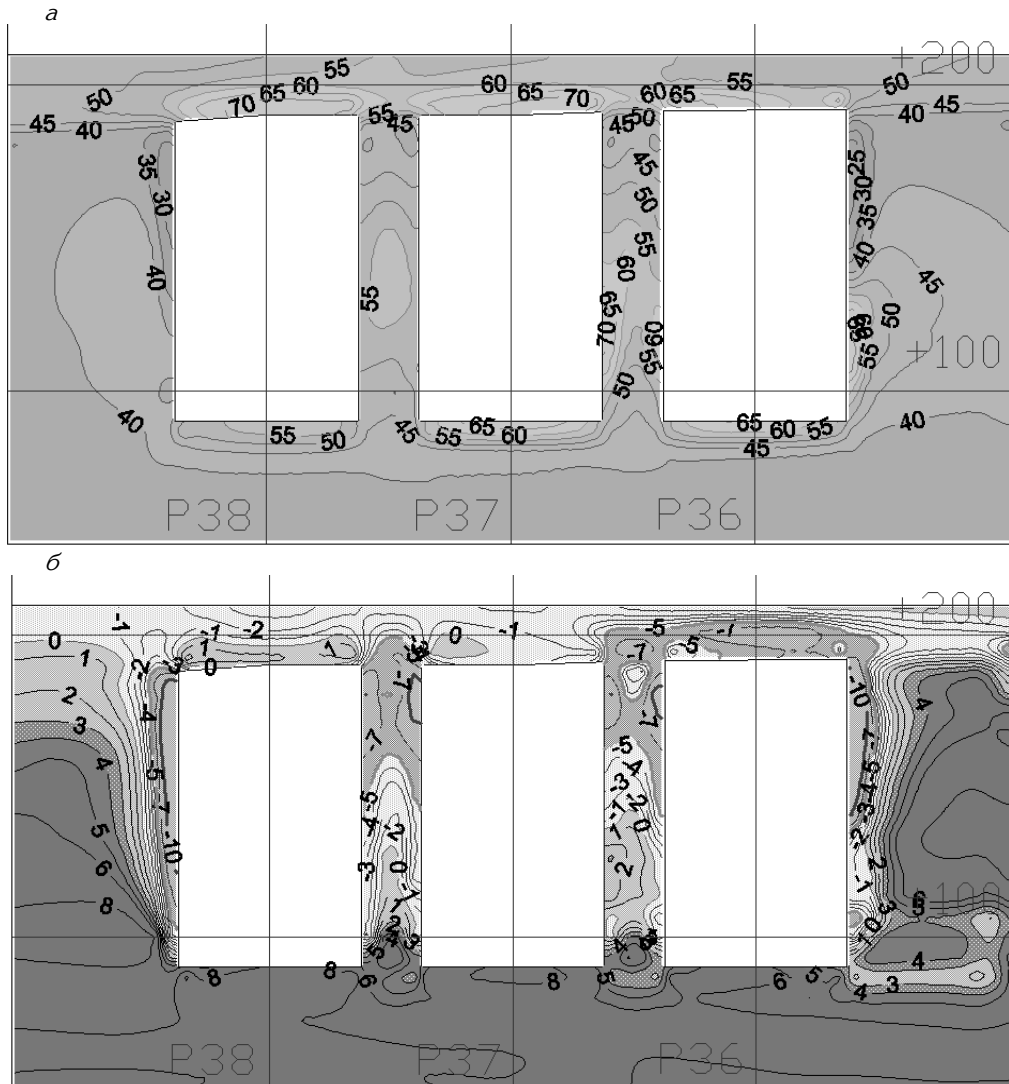


Рис. 4. Распределение напряжений для варианта с тремя камерами (целики 20 м) в окрестности камер в сечении по простиранию рудной залежи: а — σ_{\max} б — σ_{\min}

То есть, полученные величины в зонах концентрации напряжений составляют до $0.5\sigma_{\text{сж}}$ ($\sigma_{\text{сж}}$ — предел прочности пород на одноосное сжатие). Растягивающие напряжения в кровле одной из камер достаточно высокие, но не выходят на дневную поверхность. Однако, необходимо увеличение мощности потолочины в

связи с повышенной трещиноватостью приповерхностных пород.

В следующем варианте рассчитывали НДС при уменьшении междукamerных целиков до 15 м. Уровень напряжений σ_{\max} в потолочине и междукamerных целиках возрастает приблизительно на 5%, рост растягивающих напряжений σ_{\min} незначительный.

Несмотря на достаточно высокий уровень растяжений в стенках (особенно в верхней части камер), реализация разрушений здесь маловероятна в силу следующих факторов:

- массив умеренно «поджат» сжимающими напряжениями;

- направление потенциальных трещин отрыва субгоризонтальное.

Был просчитан также вариант с 10-метровыми целиками, однако, в этом случае в междуканальных целиках происходит дальнейший рост сжимающих напряжений до 75 МПа,

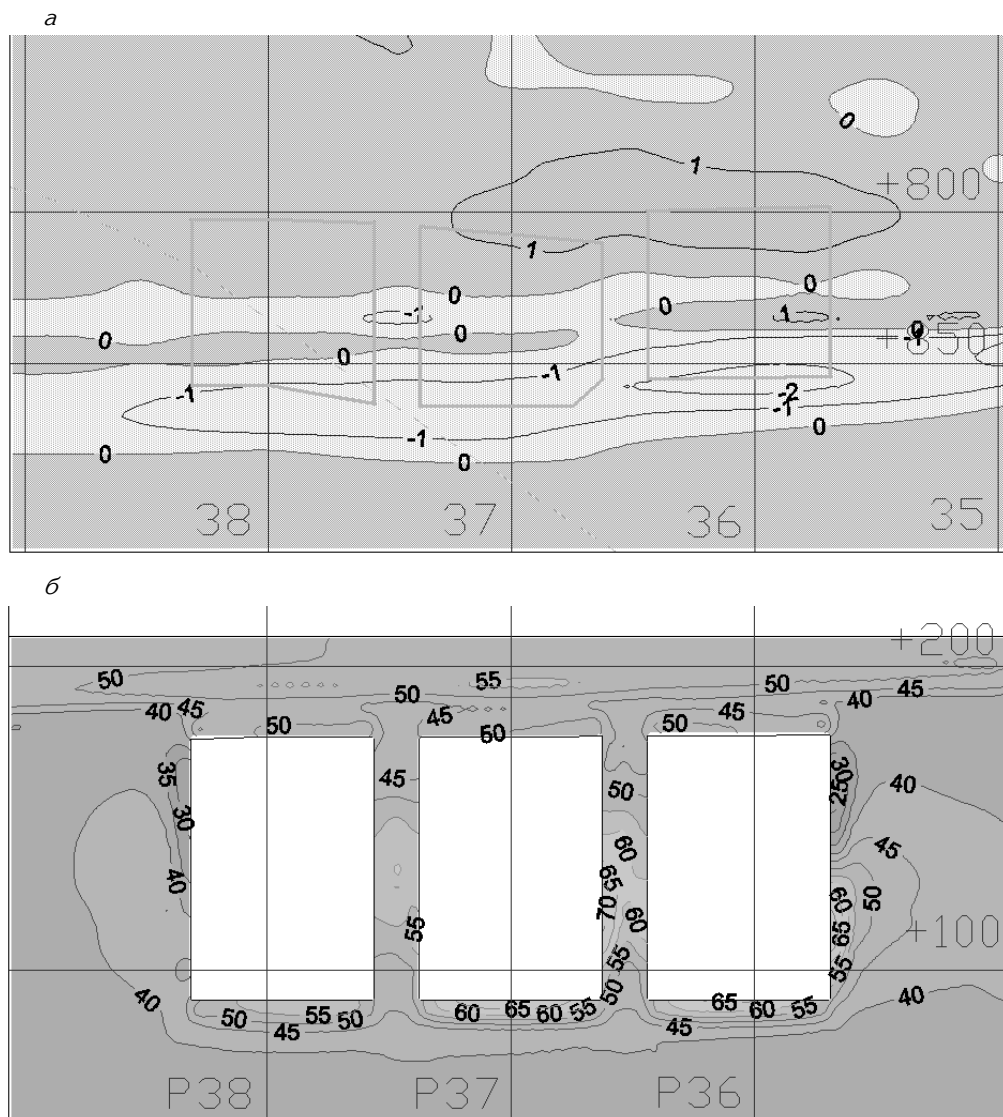


Рис. 5. Распределение напряжений для варианта с тремя камерами и увеличенной потолочной (целики 15м): а — σ_{\min} в слое элементов под дневной поверхностью; б — σ_{\max} в окрестности камер в сечении по простиранию рудной залежи

также достаточно существенно увеличиваются σ_{\max} в днищах камер. Поэтому, размер междукамерных целиков должен составлять не менее 15 м для камер протяженностью 60 м.

Далее был рассмотрен вариант с увеличением минимальной мощности потолочины камер до 30 м и междукамерными целиками 15 м (рис. 5). Это дает видимый эффект в приповерхностной зоне, где уровень растягивающих σ_{\min} становится близок к исходным величинам и не превышает 2 МПа. Уровень сжимающих напряжений в кровле камер ниже в 1.4 раза при увеличении мощности потолочины на 10—15 м. В междукамерных целиках и днище камер геомеханическая ситуация меняется незначительно.

При имитации дальнейшего развития горных работ, а именно формировании 5 и затем 7 камер верхнего этажа с выбранными параметрами, зоны концентраций напряжений под поверхностью приурочены к перегибу рельефа в районе разреза 34 и границам камер со стороны лежачего бока. Уровень напряжений в междукамерных целиках и днищах камер меняется незначительно и не превышает для максимальной сжимающей компоненты 65 МПа, а для растягивающих напряжений — 7 МПа. Значения растяжений выше в стенках крайних камер. Следует отметить, что ориентация трещин отрыва в стенках камер такова, что реализация локальных разрушений может происходить в угловой зоне потолочины камеры со стороны лежачего бока.

Таким образом, по результатам проведенных численных геомеханических исследований массива пород можно предложить следующие размеры камер и целиков:

- размер камеры — 60 м;

- размер междукамерного целика — 15 м;

- мощность приповерхностного целика — не менее 30 м

Причем, в случае выраженной трещиноватости приповерхностного слоя пород необходимо увеличивать его мощность до 50 м. С целью уточнения параметров камер и целиков и определения нарушенности верхнего слоя пород необходимо проведение дополнительных натуральных исследований.

Выводы

1. В результате мелкомасштабного моделирования с учетом основной горно-геологической и геомеханической информации оценена изменчивость исходного поля напряжений в районе месторождения Партомчорр, которое характеризуется как высоконапряженное (значения максимальной компоненты сжимающих напряжений от 40 до 55 МПа) с ориентацией σ_{\max} по простиранию рудных тел в высотных отметках будущих подземных горных работ.

2. Показано, что сплошная выемка запасов с оставлением природоохранных целиков, например, при применении системы разработки с поэтажным обрушением, приведет к обрушению подработанной толщи пород до дневной поверхности.

3. На основании анализа результатов крупномасштабного моделирования НДС для варианта системы с открытым очистным пространством сделан вывод о том, что допустимыми по уровню напряжений являются размеры камер и целиков, 60 м и 15—20 м соответственно. При данных параметрах максимальная компонента сжимающих напряжений не превышает в целиках 65 МПа, что составляет $\approx 0.5\sigma_{сж}$ (где $\sigma_{сж}$ — предельное значение прочности пород на одноосное сжатие).

В связи с наличием зон концентраций растягивающих напряжений в приповерхностном целике при применении этажно-камерной системы его мощность должна быть не

менее 30 м. В случае выраженной трещиноватости приповерхностного слоя пород необходимо увеличить мощность приповерхностного целика до 50 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений. Сборник тр. Всероссийской научной конференции с международным участием «Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ» Апатиты; Санкт-Петербург 2009, с. 251—256.

2. *Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Часть 1* // Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 1996.

3. *Технико-экономические предложения участника конкурса на разрешение пользования недрами с целью добычи апатит-нефелиновых руд месторождения Партомчорр в Мурманской области.* // Москва, 2006. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козырев Анатолий Александрович — профессор, доктор технических наук, заместитель директора, kozar@goi.kolasc.net.ru,

Семенова Инна Эриковна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, innas@goi.kolasc.net.ru,

Земцовский Александр Васильевич (заочно) — научный сотрудник, zemtsovskiy@yandex.ru
Горный институт Кольского научного центра РАН.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПРОГРАММЫ КУРСА «ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ»

(№ 958/05-13 от 06.03.13, 03 с.)

Волошиновский Кирилл Иванович — ассистент кафедры АТ,
gas7dev@gmail.com Московский государственный горный университет,

THE PRACTICAL PART OF THE COURSE PROGRAMME «RESEARCH AND TESTING OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS»

Voloshinovskiy Kirill Ivanovich